

Обзор современных геофизических методов исследования скважин

¹***ШАХАТОВА Алия Талгатовна**, докторант, shakhatovaa@list.ru,

¹**МИРФАЛИҚЫЗЫ Толқын**, PhD, доцент, m_t85@mail.ru,

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан, 010008, Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Проведен обзор современных геофизических методов исследований скважин, позволяющих определять геологические характеристики пород и контролировать режим работы пластов в процессе бурения скважин. Исследования скважин на основе методов электромагнитного каротажа проводятся уже десятки лет, тем не менее качественная интерпретация радарограмм является востребованной. В связи с этим анализ существующих методов в мире для выбора оптимального алгоритма решения интерпретации радарограмм по электромагнитной разведке является актуальным. Существует гораздо большее разнообразие доступных методов, чем в порядковых методах разведки, в котором используется единое силовое поле или аномальное свойство земли – гравитация, магнетизм, упругость, радиоактивность. Используя электрические методы, можно измерять потенциалы, токи и электромагнитные поля, которые возникают естественным образом или возникают искусственно в земле. Электропроводность недр, как известно, является решающим параметром для характеристики геотермальных условий. Для интерпретации радарограмм в данной статье указаны два подхода, а именно инженерно-технические методы и строго обоснованный алгоритм построения на основе математического моделирования.

Ключевые слова: электромагнитная разведка, геофизические методы, удельное сопротивление, электромагнитный каротаж, интерпретация радарограмм.

Введение

Методы геофизических исследований на основе электромагнитной разведки используются для вертикальных, наклонно-направленных, а также для горизонтальных скважин [1]. В качестве источников в систематическом литературном обзоре выступают научные интернет-ресурсы «Scopus». В написании данной статьи за основу взяты теоретические материалы ученых Telford W., Geldart L., Sheriff R., собранных в монографии в Кэмбридже под названием «Applied Geophysics» (Прикладная геофизика), 2-издание, в 2004 году. На основе анализа публикаций, которые имеют большое количество цитирований посредством международной базы Scopus, а также используя методы, описанные в пятой главе монографии [2] «Электрические свойства горных пород и минералов», был проведен литературный обзор по наиболее цитируемым статьям.

Не остались без внимания и работы ученых из ближнего зарубежья, в том числе России и отечественных ученых. Особо хотелось бы отметить, что в России ежегодно проводятся конференции в МГУ имени М.В. Ломоносова «Электроразведка». В рамках конференции проходит выставка геофизического оборудования и программного обеспе-

чения для инженерных изысканий. На мероприятии выступают ведущие эксперты по технологиям электроразведки: производители электроразведочной аппаратуры, сильнейшие методисты, научные специалисты, занимающиеся теоретическими разработками и физическим моделированием по тематике «Электроразведка». Также рассматривается широкий круг вопросов по новейшим георадарным приборам, производимым в дальнем и ближнем зарубежье, таким как: КБ «Электроразведка», «Radar Systems» Inc.(Riga, Latvia) НПО «Терразонд», ООО «ГЕОСИГНАЛ», НПЦ «Геоскан», Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН, «SPH Engineering», Riga, Latvia, ООО «Северо-Запад», «СибГеофизПрибор», «Радарные и Сейсмические Системы», Лаборатория магниторазведки, а также методов интерпретации георадарных данных, разрабатываемых на кафедре геофизических методов разведки полезных ископаемых МГУ имени М.В. Ломоносова [3].

Результаты исследований

1. Основные понятия метода электромагнитного каротажа

Электромагнитный каротаж – это способы

изучения скважин, которые были основаны на исследовании электромагнитных параметров горных пород. Этот способ употребляется для анализа недр земли на наличие в ней разных веществ, к примеру, нефти, газа, металлов и других.

Для каротажа применяется особый зонд, состоящий из 2-х катушек, одна из них генераторная, другая приемная (антенна).

Генераторная катушка источает в землю электрическую волну с фиксированной частотой. Оказавшаяся в земле горная порода начнет вести взаимодействие с полем и увеличит его. Приемная катушка воспринимает усиленный фон, измеряются амплитуды и время задержки отраженных электрических шатаний. По итогам измерений определяют электрические свойства породы, т.е. рассредоточивают по глубине удельного электронного сопротивления и условной диэлектрической проницаемости.

Данный метод реализован на электрическом зондировании донных отложений и имеет возможность использования для выявления и описания углеводородосодержащих резервуаров на глубоководных площадях. Почвой метода считается внедрение мобильного горизонтального электронного диполя и площадного приемного контура, помещенных на дне моря. Диполь источает низкочастотный электрический знак ввысь, в воду и книзу, в толщу морских осадков. Очертание определяет амплитуду и фазу принимаемых сигналов, которые находятся в зависимости от сопротивления отложений ниже дна моря. На глубоководных площадях осадки имеют относительно маленькое противодействие, а углеводородосодержащие отложения имеют все шансы обладать противодействием в 10-100 один более.

Приобретенные данные применяются для определения месторасположения и основных характеристик геологических структур и рудных тел.

В связи с этим, можно выделить основные направления исследований на основе электромагнитного каротажа:

1) полевую поисковую геофизику (field exploration geophysics);

2) промысловую разведочную геофизику (development geoeexploration).

Данные направления имеют соответствующие задачи:

- выяснение регионального глубинного строения осадочных бассейнов или же их отдельных областей и районов, поиски и подготовка к бурению локальных структур, способных быть ловушками для нефти и газа.

- подготовка месторождения к разработке и подсчет запасов промышленных категорий.

2. Систематический обзор работ исследований скважин в дальнем зарубежье

Систематический литературный обзор – это форма вторичного исследования, в котором используется четко определенная методология для

выявления, анализа и интерпретации всех имеющихся свидетельств, связанных с конкретным вопросом исследования. Данный метод проведения литературного обзора дает возможность экономить временные ресурсы и сузить список анализируемой литературы с помощью фильтрации посредством ключевых слов.

В качестве источников в систематическом литературном обзоре выступают научные интернет-ресурсы «Scopus». В первую очередь необходимо определиться с ключевыми словами для поиска соответствующей литературы в международной базе «Scopus».

Ключевыми словами для поиска были подобраны следующие слова:

- электроразведка;
- геофизические методы;
- интерпретация радарограмм;
- электромагнитный каротаж.

На рисунке 1 представлена статистика опубликованных статей согласно ключевым словам в период с 2011 по 2020 годы. Данный график показывает определенную популярность темы обнаружения поверхностных эффектов от протекания электрического тока в земле, что обуславливает актуальность исследования по данной тематике.

На рисунке 2 представлена тенденция заинтересованности стран в исследованиях на основе электромагнитного метода. Новые технологии освоения месторождений нефти и газа требуют разработки новых подходов к анализу получаемой информации. Особенно это относится к интерпретации данных геофизических исследований скважин. В настоящее время в мировой и отечественной практике не существует общепризнанных методических рекомендаций и стандартных подходов к использованию данных, полученных геофизическим методом. В основном продолжают применяться принципы и подходы, унаследованные от вертикальных скважин. Нет четкого представления о задачах и путях их решения в области интерпретации.

Самыми популярными журналами в исследованиях в направлении геофизических методов являются: «Geophysics» от издательства Society of Exploration Geophysicists, со штаб-квартирой в Талсе, штат Оклахома, и региональными офисами в Дубае, ОАЭ, в Пекине, Китай; «Journal of Applied Geophysics» от издательства Elsevier; «Geophysical Journal International» от издательства Oxford University Press.

Согласно публикациям [4-5], электрические методы включают в себя собственный потенциал, теллурические токи и магнитотеллурию (один из методов индукционных зондирований Земли, использующий измерения естественного электромагнитного поля, удельное сопротивление, в том числе по массе, электромагнитную индукцию), в том числе AFMAG (пассивный электромагнитный метод, в котором используются естественные электромагнитные источники и измерение угла

Документы по годам

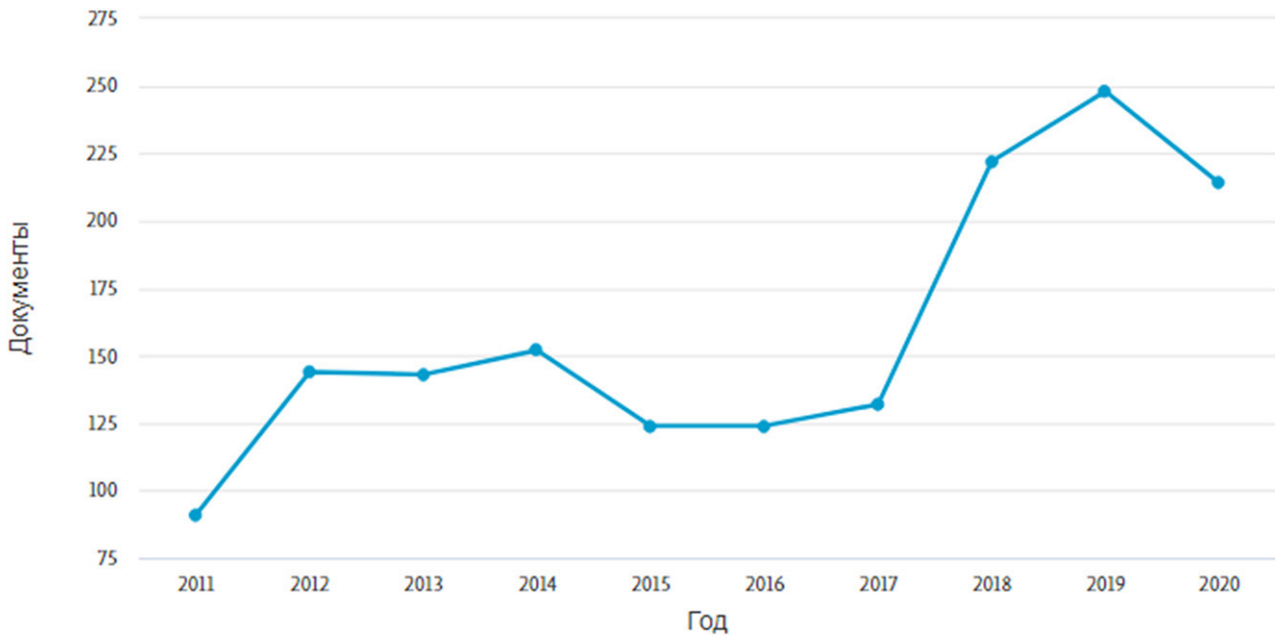


Рисунок 1 – Статистика опубликованных статей с наибольшим количеством цитирований по геофизическим методам на основе электроразведки

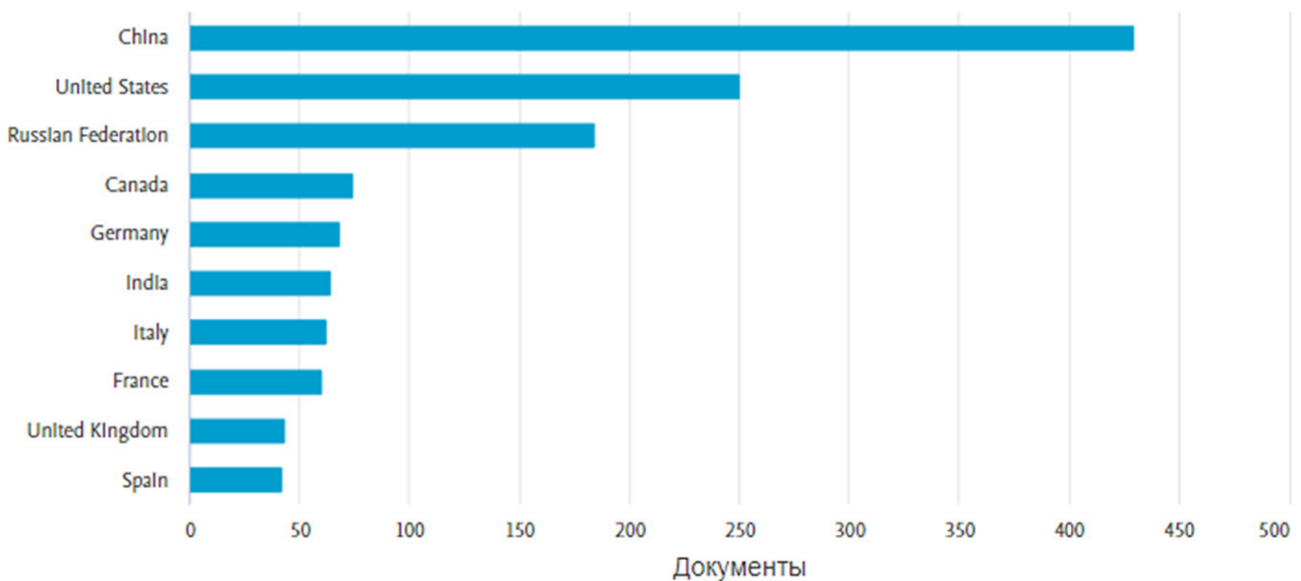


Рисунок 2 – Диаграмма заинтересованности стран в исследованиях на основе электромагнитного метода

наклона), и индуцированную поляризацию. Их часто классифицируют по типу задействованного источника энергии: естественный или искусственный. Исходя из этого, первые три и AFMAG, указанные выше, сгруппированы по естественным источникам, а остальные – как искусственные. Такая классификация может быть сделана для поисковых методов в целом. Следовательно, гравитация, магнетизм и радиоактивность включены в методы естественных источников, тогда как сейс-

мические исследования требуют искусственной энергии.

Также авторы исследуют электрические методы в нескольких различных последовательностях, сгруппировав вместе три метода естественных источников, но рассматривая AFMAG, потому что полевые методы очень похожи. По той же причине поляризация будет учитываться сразу после удельного сопротивления.

Основная цель электрического каротажа за-

ключается более точной оценке удельных электрических сопротивлений (УЭС) пластов. Для достижения этой цели применяются многокатушечные зонды. Параметры зондов выбираются таким образом, чтобы измеряемый сигнал в основном определялся УЭС неизменной части пласта, а влияние скважины и зоны проникновения было относительно небольшим. Такого рода зонды в каротаже принято называть фокусирующими.

В последние годы геофизические методы исследования, в частности электроразведка, развиваются интенсивно из-за того, что этот подход позволяет эффективно решать задачи обработки данных наблюдений и, как следствие, определить физические свойства геологического разреза.

3. Высокочастотные электромагнитные исследования скважин

Важным вкладом в развитие электромагнитных методов каротажа проводимости явились работы по теории, методике и аппаратуре, в основу которых положены измерения относительных характеристик высокочастотных электромагнитных исследований скважин. Благодаря иной основе принципа фокусировки, использование очень высоких частот обеспечило возможность измерения кажущихся значений электропроводности и диэлектрической проницаемости пластов простейшими трехэлементными зондовыми установками. Вместе с тем, практика и теория показывают, что измеряемые характеристики поля как и в традиционном ИК, так и в новых модификациях электромагнитных методов каротажа зависят от изменений градиента УЭС, электропроводности пласта и вмещающих пород. Эти ограничения ставят данные измерения в разряд качественных, если не вводить дополнительные сведения для изучения скважин.

Аппаратура высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) состоит из скважинного и наземного приборов [6].

ВИКИЗ предназначен для исследования скважин, бурящихся на нефть и газ и обеспечивает измерение кажущегося удельного сопротивления (далее – кажущееся УЭС) с помощью пяти электромагнитных зондов и потенциала самопроизвольной поляризации (ПС) с помощью электрода ПС. Аппаратура ВИКИЗ относится к восстанавливаемым изделиям.

В разработку теории исследований геофизических методов большой вклад также внесли отечественные ученые [6-10].

После проведения экспериментальных исследований с тем или иным георадаром получают радарограмму, представляющую собой временную развертку, т.е. функцию от времени пробега. Основная задача интерпретации радарограмм состоит в определении геофизического разреза среды по наблюдаемым данным в точках измерений.

Существуют два направления интерпретации

радарограмм, первое из них основано на инженерно-техническом подходе (например, можно ознакомиться в работе [7]).

С другой стороны, существует иное направление интерпретации радарограмм, основанное на математическом и компьютерном моделировании процесса распространения и отражения электромагнитных волн в среде. На практике геофизиков интересуют физические характеристики неоднородности, зависящие от пространственных координат. Для численного решения обратной коэффициентной задачи необходимо иметь табличное значение источника возмущения, а также табличные значения отраженных сигналов (откликов сред), в точках измерений. Строгие математические исследования по вопросам единственности решения обратных коэффициентных задач изучены в работе [8].

Табличное представление отклика среды использовалось как дополнительная информация для решения обратной задачи по определению геофизических свойств локализованного объекта, а функция отклика на однородной среде использована для моделирования функции источника сигнала георадара. Результаты этих исследований опубликованы в работе [9].

Широкий спектр численного решения обратных и некорректных задач приведен в монографии [10].

Заключение

В данной статье проведен систематический литературный обзор существующих геофизических методов на основе электромагнитной разведки, согласно которому сделаны выводы, что применение методов электромагнитного каротажа должно предваряться оценкой их возможностей в конкретных геоэлектрических условиях. Общей основой всех ограничений является несоответствие моделей реальному строению и физическим характеристикам геологической среды, а также наличие погрешностей при реальных измерениях в скважинах. При использовании индукционного возбуждения поля в среде и приема сигналов наибольшие ограничения связаны с изучением плохопроводящих геологических отложений. Наличие высокоомных пород приводит к уменьшению измеряемого сигнала, соответствующему возрастанию отношения шум/сигнал и относительной погрешности измерений. При инверсии таких данных относительные погрешности определения параметров возрастают настолько, что результат становится неопределенным.

С практической точки зрения особое внимание уделено методу высокочастотных электромагнитных исследований скважин. Для реализации этого метода на начальном этапе возможно применение методики высокочастотного зондирования с использованием аппаратуры ВИКИЗ, а также ряд современных георадаров, рекомендуемых проектом «Радарные и Сейсмические Системы»,

таких как Георадар Зонд-12, Георадар Питон.

Необходимость в решении обратных коэффициентных задач для гиперболических уравнений следует из практических приложений, возникающих в вопросах сейсмологии, в электроразведке, томографии, механике горных пород, археологии

и во многих задачах естествознания.

Таким образом для интерпретации радарограмм располагаем инженерно-техническим методом и строго обоснованным классом численных методов с использованием математического моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sukhorukova, K.V., et al. Electric and Electromagnetic Logging in High-Angle and Horizontal Wells: Signal Features and Examples of Inversion, 2015. SCOPUS, www.scopus.com.
2. Telford, W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. «Applied Geophysics. 2nd Edition». Applied Geophysics. 2nd Edition, 2004. SCOPUS, www.scopus.com.
3. Радарные и сейсмические системы. Высокие технологии и оборудование для георадиолокации и сейсморазведки – <https://radseismsys.ru/>
4. Muñoz, G. Exploring for Geothermal Resources with Electromagnetic Methods. Surveys in Geophysics, vol. 35, no. 1, 2014, pp. 101-122. SCOPUS, www.scopus.com, doi:10.1007/s10712-013-9236-0.
5. Demanet, D., et al. The use of Geophysical Prospecting for Imaging Active Faults in the Roer Graben, Belgium. Geophysics, vol. 66, no. 1, 2020, pp. 78-89. SCOPUS, www.scopus.com, doi:10.1190/1.1444925.
6. Аппаратура высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования. Руководство по эксплуатации. ЛУЧ 6.00.00.00 РЭ. Новосибирск, 2005. – 137 с.
7. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию: Учебное пособие. – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
8. Kabanikhin S.I. Inverse and Ill-Posed Problems. Theory and Applications, De Gruyter, Germany, 2011.
9. Mukanova B.G., Iskakov K.T., Kembay A., Boranbaev S.A. Inverse Source Identification Problem for the Wave Equation: An Application for Interpreting GPR Data // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. – 2020. – Vol.8. – issue 3., DOI:10.32523/2306-6172-2016-4-3-15-28.
10. Кабанихин С.И., Искаков К.Т., Бектемесов М.А., Шишленин М.А. Алгоритмы и численные методы решения обратных и некорректных задач. Астана, 2012. 338 с.

Ұңғымаларды зерттеудің заманауи геофизикалық әдістеріне шолу

¹*ШАХАТОВА Алия Талгатовна, докторант, shakhatovaa@list.ru,

¹МИРҒАЛИҚЫЗЫ Толқын, PhD, доцент, m_t85@mail.ru,

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, 010008, Нұр-Сұлтан, Сәтпаев көш., 2,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Тау жыныстарының геологиялық сипаттамаларын анықтауға және ұңғымаларды бұрғылау процесінде қабаттардың жұмыс режимін бақылауға мүмкіндік беретін ұңғымаларды зерттеудің заманауи геофизикалық әдістеріне шолу жасалды. Электромагниттік каротаж әдістеріне негізделген ұңғымаларды зерттеу ондаған жылдар бойы жүргізіліп келеді, дегенмен, радарограммаларды сапалы енгізу сұранысқа ие. Осыған байланысты электромагниттік барлау радарограммаларын түсіндірудің оңтайлы алгоритмін таңдау үшін әлемдегі қолданыстағы әдістерді талдау өзекті болып табылады. Бір күш өрісін немесе жердің аномалды қасиетін – ауырлық, магнетизм, серпімділік, радиоактивтілікті қолданатын реттік барлау әдістеріне қарағанда әлдеқайда көп әдістер бар. Электрлік әдістерді қолдана отырып, табиғи түрде пайда болатын немесе жасанды түрде жерде пайда болатын потенциалдарды, токтарды және электромагниттік өрістерді өлшеуге болады. Жер қойнауының электр өткізгіштігі геотермалдық жағдайларды сипаттау үшін шешуші параметр болып табылады. Радарограммаларды түсіндіру үшін осы мақалада екі тәсіл көрсетілген, атап айтқанда, инженерлік-техникалық әдістер және математикалық модельдеу негізінде құрудың қатаң негізделген алгоритмі.

Кілт сөздер: электромагниттік барлау, геофизикалық әдістер, меншікті кедергі, электромагниттік каротаж, радарограммалардың интерпретациясы.

Review of Up-to-date Geophysical Well Survey Methods

¹*SHAKHATOVA Aliya, doctoral student, shakhatovaa@list.ru,

¹MIRGALIKYZY Toklyn, PhD, Associate Professor, m_t85@mail.ru,

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, 010008, Nur-Sultan, Satpayev str., 2,

*corresponding author.

Abstract. A review of modern geophysical methods of well survey is carried out that allows determining the geological characteristics of rocks and controlling the mode of operation of layers in the process of drilling wells. Well studies based

on electromagnetic logging methods have been carried out for tens of years, nevertheless, high-quality interpretation of radarograms is in demand. In this regard, the analysis of the existing methods in the world for selecting the optimal algorithm of solving interpretation of radarograms for electromagnetic exploration is relevant. There is a much wider variety of methods available than ordinal methods of exploration, which use a single force field or anomalous property of the earth: gravity, magnetism, elasticity, radioactivity. Using electrical methods, it is possible to measure potentials, currents and electromagnetic fields that occur naturally or artificially in the earth. Electrical conductivity of the subsoil is known to be the decisive parameter for characterizing geothermal conditions. For interpretation of radarograms, in this article two approaches are indicated, namely engineering and technical methods and a strictly justified construction algorithm based on mathematical modeling.

Keywords: *electromagnetic prospecting, geophysical methods, resistivity, electromagnetic logging, interpretation of radarograms.*

REFERENCES

1. Sukhorukova, K.V., et al. Electric and Electromagnetic Logging in High-Angle and Horizontal Wells: Signal Features and Examples of Inversion, 2015. SCOPUS, www.scopus.com.
2. Telford, W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. «Applied Geophysics. 2nd Edition». Applied Geophysics. 2nd Edition, 2004. SCOPUS, www.scopus.com.
3. Radarnye i seismicheskie sistemy. Vysokie tekhnologii i oborudovanie dlya georadiolokatsii i seismorazvedki – <https://radseismsys.ru/>
4. Muñoz, G. Exploring for Geothermal Resources with Electromagnetic Methods. Surveys in Geophysics, vol. 35, no. 1, 2014, pp. 101-122. SCOPUS, www.scopus.com, doi:10.1007/s10712-013-9236-0.
5. Demanet, D., et al. The use of Geophysical Prospecting for Imaging Active Faults in the Roer Graben, Belgium. Geophysics, vol. 66, no. 1, 2020, pp. 78-89. SCOPUS, www.scopus.com, doi:10.1190/1.1444925.
6. Apparatura vysokochastotnogo induktsionnogo karotazhnogo izoparametricheskogo zondirovaniya. Rukovodstvo po ekspluatatsii. LUCH 6.00.00.00 RE. Novosibirsk, 2005. – 137 s.
7. Vladov M.L., Starovoitov A.V. Vvedenie v georadiolokatsiyu: Uchebnoe posobie. – M.: Izdatelstvo MGU, 2004. – 153 s.
8. Kabanikhin S.I. Inverse and Ill-Posed Problems. Theory and Applications, De Gruyter, Germany, 2011.
9. Mukanova B.G., Iskakov K.T., Kembay A., Boranbaev S.A. Inverse Source Identification Problem for the Wave Equation: An Application for Interpreting GPR Data // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. – 2020. – Vol.8. – issue 3., DOI:10.32523/2306-6172-2016-4-3-15-28.
10. Kabanikhin S.I., Iskakov K.T., Bektemesov M.A., Shishlenin M.A. Algoritmy i chislennyye metody resheniya obratnykh i nekorrektnykh zadach. Astana, 2012. 338 s.